干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.03.10

1990—2015 年喜马拉雅山东段中国和不丹边境地区冰川变化研究[①]

王　晶，　杨太保，　冀　琴，　秦　艳，　胡凡盛
（兰州大学资源环境学院，冰川与生态地理研究所，甘肃　兰州　730000）

摘　要： 利用 Landsat 影像，EDM 影像等数据资料，使用遥感图像处理及目视解译方法提取了喜马拉雅山东段中国与不丹边境地区冰川从 1990—2015 年 4 期边界，研究其与气温降水变化关系，并选取特定冰川，对其表面流速进行估算。研究表明：1990—2015 年，该地区冰川退缩速率达 0.43%·a^{-1}，并且冰川年退缩率逐渐增大，表明冰川消融速度逐渐加快。该时段内，气温呈现明显上升趋势，导致了冰川的快速消融。通过对冰川表面流速的估算，得出中国与不丹边境地区研究选取的冰前湖对冰川流速具有促进作用，加速冰川消融。

关 键 词： Landsat 影像；喜马拉雅山东段；冰川变化；表面流速估算

文章编号： 1000－6060(2019)03－0542－09(0542～0550)

冰川变化是气候变化的灵敏指标[1]，随着气候的不断变化，温度的不断上升，不同地区的冰川均呈现不断消融的变化趋势[2－4]。近年来，使用遥感影像对冰川变化进行检测，克服了冰川研究的地域地区局限性[5－6]。喜马拉雅山位于青藏高原南部边沿，具有良好的发育现代冰川的地貌条件，面对发源于印度洋的夏季西南季风，冰川补给条件也十分有利[7]。在不断变暖的环境下，海洋型冰川对径流变化反应快速[8]。过去的研究多集中在喜马拉雅山中东段的中国境内部分冰川[9]，对喜马拉雅山地区东段冰川其他区域变化的研究相对较少。本文的研究区位于喜马拉雅山东段地区，包括按中国与不丹国境线划分的不丹境内的喜马拉雅冰川，以及与两国国境线相邻的中国境内的喜马拉雅冰川，在下文中将其简称为中国和不丹边境地区。喜马拉雅山东段冰川分布集中在该地区，该地区冰川极好的代表了喜马拉雅山东段地区的冰川变化情况，研究气候变暖背景下海洋冰川的变化情况具有重要意义。本文选取 1990—2015 年该地区的遥感图像数据，并提取 1990 年、2000 年、2010 年以及 2015 年的四个冰川边界。研究其边界变化与气温变化的相关关系。并选取了研究区内两条相邻冰川，对其表面流速进行估算，对比两条冰川，发现新的对冰川运动有影响的因素以及其影响方式。

1　研究区概况

喜马拉雅山由几条相互平行的山脉组成，其中以大喜马拉雅山为现代冰川的主要分布地区。喜马拉雅山脉分为三段，西段为南迦帕尔巴特峰到纳木那尼峰，中段为纳木那尼峰至绰莫拉日峰，东段为绰莫拉日至南迦巴瓦峰[10]。

喜马拉雅山东段冰川以中国和不丹边境一带分布最多，冰川面积较大。研究区选择中国与不丹交界处的喜马拉雅地区，研究区冰川在不丹与中国境内均有分布，冰川面积 2015 年为 1 587.50 km^2，海拔最高为 7 515 m[11]。研究区分为两部分，以中国与不丹的国境线为界，包括不丹境内的全部喜马拉雅冰川以及与中国不丹国境线相邻的中国境内喜马拉雅山冰川。研究区所在地理位置 89°10′0″～91°60′0″E，27°30′0″～28°30′0″N，东西方向横跨约 294 km，南北方向跨度约 106 km。

依据气候类型，雪线温度等指标，划分不同冰川

① 收稿日期：2018－09－27；　修订日期：2019－01－29
基金项目：国家自然科学基金项目(41271024)；兰州大学地理学基地科研训练及科研能力提高项目(J1210065)
作者简介：王晶(1993－)，女，内蒙古巴彦淖尔人，硕士研究生，研究气候变化. E-mail：wj2016@lzu.edu.cn
通讯作者：杨太保(1962－)，男，山西运城人，教授，博士生导师，主要从事自然地理环境变化研究. E-mail：yangtb@lzu.edu.cn

类型,以北边的唐古拉山东段主峰布加岗日、西南方向的嘉黎、工布江达、措美作为西藏地区大陆冰川与海洋冰川的分界线,这条线的东部地区为西藏海洋性冰川分布地区[12]。喜马拉雅山东段因受印度洋季风的影响,仍属于海洋性冰川,此处夏季降水较多[13]。

2　数据与方法

2.1　数据

本文使用的数据包括:(1) 遥感影像数据。该数据来自美国地质调查局(http://glovis.usgs.gov/),该产品经过系统辐射校正和地面控制点几何校正,并利用 DEM 数据进行了高精度的地形校正。(2) 气象格点数据。选用特拉华大学(UDel)地理系气候研究中心的气温和降水格点数据[14]。格点经度范围介于 89.25°~91.75°E,纬度介于 27.75°~28.25°N,共选取了 12 个格点,以各个格点为中心,建立半径为 50 km 的缓冲区,缓冲区覆盖研究区内全部冰[15]。(3) DEM 数字高程数据。选用了空间分辨率 30 m×30 m 的 ASTER GDEM 数据,来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)。(4) 其他数据,包括 Google earth 数据、全球[16]冰川编目数据、中国冰川编目数据、中国行政基础地理数据等。

2.2　方法

冰川边界提取的方式有很多种,主要有监督分类法、雪盖指数法、比值阈值法[17-18]等。本文选用比值阈值法进行提取,获得冰川的初步提取结果。这种方法将卫星影像转化为二值进行区分,使用阈值的设定将冰川选取出来,得到初步的边界。将卫星影像的波段按 Band5、4、3 进行合成,冰川颜色呈淡蓝色,然后通过目视解译进行冰川边界的修正。冰川提取使用 1985—2017 年间遥感影像,为消除季节性积雪的影响,多选择夏季 7~9 月间少云清晰的遥感影像,使用时仅单幅使用,未进行拼接,交叠区域使用多幅影像对照参考。结合冰川编目数据,对冰川进行分条划分。为使结果更加准确,避免冰川末端冰碛物对冰川提取的影响,借助谷歌地球进行校正,结合冰川发育的地貌特征以及末端颜色深浅的变化对比,得到最终冰川边界[19]。

3　结果与分析

3.1　冰川面积变化

统计研究区冰川面积变化情况(表 1)。研究区冰川总面积 1990 年为 1 779.37 km^2,2000 年冰川面积为 1 713.48 km^2,2010 年冰川面积为 1 633.35 km^2,到 2015 年为 1 587.50 km^2。1990—2015 年,冰川退缩面积达 191.87 km^2,占 1990 年冰川总面积的 10.78%,25 a 间冰川呈现逐渐退缩的趋势。1990—2000 年,冰川面积减少 65.89 km^2,年退缩率为 0.37%·a^{-1};2000—2010 年间,冰川面积减少 80.12 km^2,年退缩率为 0.47%·a^{-1};2010—2015 年间,冰川面积减少 45.85 km^2,年退缩率为 0.56%·a^{-1},1990—2015 年间,冰川退缩速率为 0.43%·a^{-1}。

研究区冰川总面积的不断变小,冰川年平均退缩率逐渐增大,表明该地区冰川消融速度逐渐加快。节取吕卉[20]文章中,部分冰川退缩情况表,并与本文的研究进行对比(表 2)。

对比可知,本文计算所得的退缩速率与其他文章中东段地区退缩速率差别不大,退缩速率快于喜马拉雅山脉西段,慢于喜马拉雅山脉中段。喜马拉雅山冰川整体呈现不断地退缩态势,中段冰川退缩速率相对更快,东段冰川及西段冰川退缩速率较慢,应与喜马拉雅的纬度位置、地形分布、温度变化以及水汽来源方向有关。喜马拉雅山脉整体呈现东西走向,但中段相对东西段而言,纬度位置更低,对气候变化的响应更为敏感。喜马拉雅山脉东段,水汽来源相对中西段更充足,丰富的补给使得其退缩速率慢于中段。就喜马拉雅山脉西段而言,整体海拔高度较高,故而冰川退缩速度较慢。

3.2　面积分级

冰川规模按国际通用标准划分[28],以2为底

表 1　1990—2015 年冰川面积变化情况

Tab.1　Glacier area variation from 1990 to 2015

	面积 / km^2	减少面积 / km^2	年变化率 / %
1990 年	1 779.37		
2000 年	1 713.48	-65.89	-0.37
2010 年	1 633.35	-80.12	-0.47
2015 年	1 587.50	-45.85	-0.56
1990—2015 年		-191.86	-0.43

表 2　喜马拉雅山不同地区冰川变化速率对比

Tab. 2　Comparison of glacier variation rate in different section of Himalayan

地理区域	山脉、流域、冰川名称	时段	年均变化率	文献
东段	洛川地区	1990—2000	-0.31	李治国等[12]，2011
		2000—2007	-1.07	
		1980—2007	-0.61	
东段	北坡然乌错流域	1980—2001	-0.03	刘时银等[21]，2005
东段	南迦巴瓦	1990—2000	-0.48	吕卉[22]，2013
		2000—2010	-0.58	
		1980—2010	-0.45	
东段	中国和不丹边境地区	1990—2000	-0.37	本文
		2000—2010	-0.47	
		2010—2015	-0.56	
		1990—2015	-0.43	
中段	锡金	1997—2004	-0.36	KULKARNI[23]，2011
中段	希夏邦马东坡吉葱普	1990—1996	-0.8	车涛[24]，2005
		1996—2000	-0.96	
		2000—2003	-0.53	
中段	希夏邦马东坡热强	1990—1996	-1.2	车涛等[24]，2005
		1996—2000	-1.62	
		2000—2003	-1.32	
中段	吉隆藏布、年楚河流域及尼泊尔境内部分冰川	1990—2000	-1.44	吕卉[22]，2013
		2000—2010	-1.18	
	希夏邦马峰地区	1990—2000	-0.58	吕卉[22]，2013
		2000—2010	-0.78	
西段	纳木那尼峰	1990—1999	-0.23	叶庆华等[25]，2007
		1999—2003	-0.96	
西段	纳木那尼峰、冈仁波齐峰	1990—1999	-0.31	叶庆华等[26]，2008
		1999—2003	-0.35	
西段	玛旁雍错流域	1990—1999	-0.29	YE，等[27]，2008
		1999—2003	-0.13	

数，以面积 $2^{n-1}\sim2^{n}$ km^{2}为标准划分，n 取 -5～6 的整数，以此为标准本文把研究区冰川规模分为 13 个区间，每个区间的冰川分布情况见图 1。研究区冰川在 $2^3\sim2^4$ 面积段内分布最为集中，研究区小面积冰川数量较多，数量最多的冰川集中在 $2^{-2}\sim2^{-1}$、$2^{-1}\sim20$ 的区域内。研究区 $\leqslant2^{-5}$、$2^{-5}\sim2^{-4}$、$2^{-4}\sim2^{-3}$、$2^{-3}\sim2^{-2}$、$2^{-2}\sim2^{-1}$、$2^{-1}\sim2^{0}$、$2^{0}\sim2^{1}$、$2^{1}\sim2^{2}$、$2^{2}\sim2^{3}$、$2^{3}\sim2^{4}$、$2^{4}\sim2^{5}$、$2^{5}\sim2^{6}$、$\geqslant2^{6}$ 规模等级内冰川面积变化率分别为 0.22%、0.60%、1.13%、1.30%、-1.57%、-0.96%、-23.40%、-8.41%、-20.50%、-27.38%、2.11%、-21.72%、-1.42%。表明研究区小面积冰川数量、面积增加，面积 >1 km^2 的冰川变化更为显著（图 1）。

区域内冰川整体面积呈现缩小的趋势，不同分级的冰川面积大多呈现退缩的变化趋势。较大面积的冰川数量变少，可能是由于大面积的冰川不断缩小，使其面积分级不断降低，同时较大面积的冰川不断裂解成几个小面积的冰川。小面积冰川数量略微增加，但增加幅度不大。结合影像可知，原有小面积冰川在一定程度上消失或缩小，故小面积冰川增大不明显，不同面积级别的冰川呈现不同的变化状态。

3.3　坡向分布

对研究区冰川按不同坡向划分为东向、东北向、北向、西北向、西向、西南向、南向、东南向 8 个朝向[29]，并对比 1990 年、2000 年、2010 年、2015 年 4 个时段，得到冰川面积变化特点。每期冰川面积分布变化不大，以北向、西北向、东北向为主要分布坡向（图 2）。冰川面积退缩以东向、东南向、东北向为主要退缩方向，25 a间这3个坡向退缩面积分别为

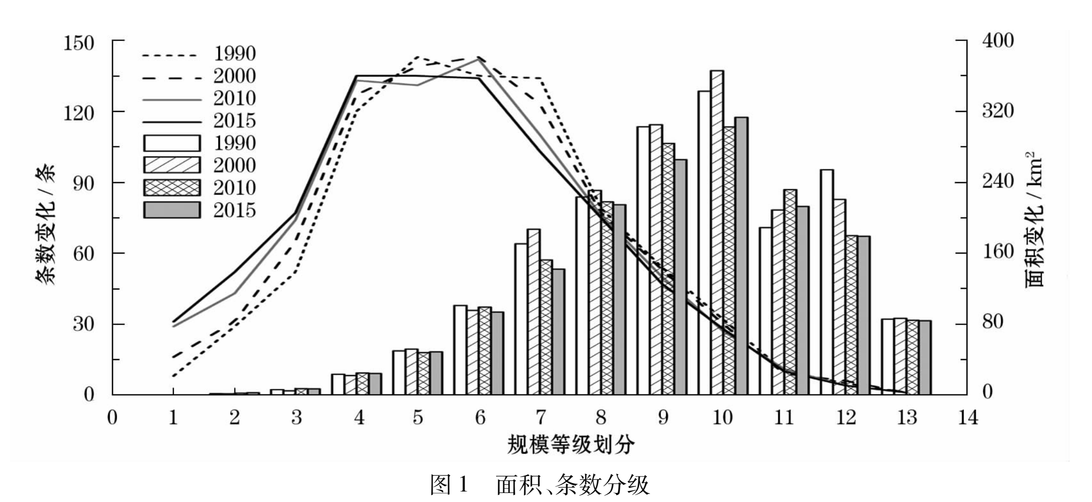


图 1　面积、条数分级

Fig. 1　Change of glacier area and number classification

12.28 km^2、11.61 km^2、11.58 km^2,其余方向冰川面积退缩均为 10 km^2 左右。冰川退缩速率以东向、东南向、东北向退缩速度最快,退缩速率分别为 0.49 $km^2 \cdot a^{-1}$、0.46 $km^2 \cdot a^{-1}$、0.46 $km^2 \cdot a^{-1}$,其他方向面积年退缩速率相近,接近 0.40 $km^2 \cdot a^{-1}$左右(图 3)。

冰川面积分布的坡向不同,可能与冰川分布地形以及海拔变化有关,西部及北部地区相对纬度略高于东部南部地区,更有利于冰川的发育及存在。喜马拉雅中段、高原南部和东南部可能存在的水汽通道,对冰川面积变化有一定贡献[30]。冰川的退缩是地形、温度等因素多尺度上共同作用的结果[31]。

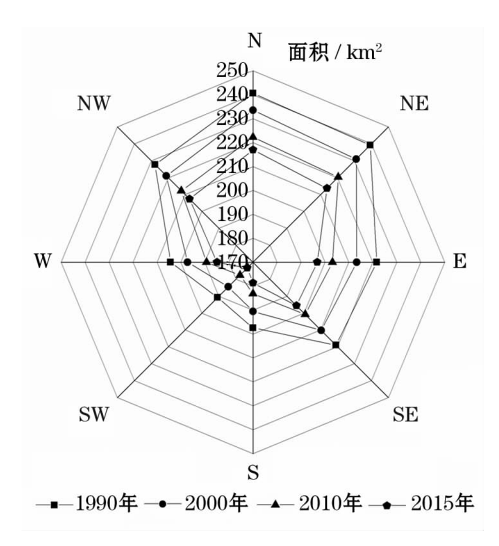


图 2　不同坡向面积分布

Fig. 2　Glacier areas distribution on different slope aspect

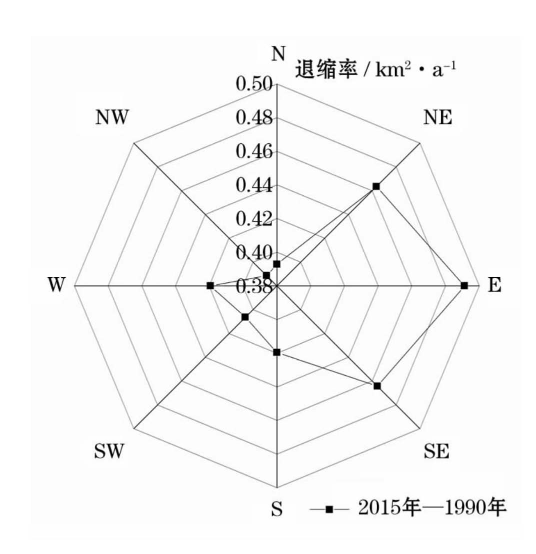


图 3　不同坡向面积变化

Fig. 3　Change in glacier area on different slope aspect

3.4　冰川变化对比分析

冰川变化被认为是气候变化的产物,气候变化影响着冰川的积累与消融。一般认为冬季降水促进冰川的积累,夏季升温促进冰川的消融。故对气温及降水数据进行研究,并与冰川变化进行对比分析。

3.4.1　研究区气候变化情况　本文使用气象格点数据,考虑到研究区面积,以及各个格点的影响范围,以各个格点为中心,做 50 km 的缓冲区,缓冲区内所包含的冰川面积比重即为格点权重。根据格点温度、降水数据以及所确定的值,利用加权平均方法分别计算得到研究区各年、各月平均温度值及降水量。气象格点位置以及权重见表 3[31]。可获得的气象降水数据仅至 2013 年,故计算 1980 年—2013 年气候变化情况,与冰川变化情况进行拟合。

用一元线性函数对温度降水数据进行分析拟合,检验系数包括相关系数 R 值以及回归 P 值,以 $P \leqslant 0.01$ 为非常显著,$0.01 < P \leqslant 0.05$ 为显著,$P > 0.05$ 为不显著。年平均温度是每个网格点 12 个月温度值的算术平均值,夏季平均温度是 5 ~9 月研究区域内每个网格点温度的算术平均值。冬季平均温度是研究区域 10 ~4 月每个网格点温度的算术平均值。对年均温、夏季均温、冬季均温进行一元线性拟合,得到了研究区气温变化趋势图[32]。

由图 4 显示,研究区 1980—2013 年年均温的一元线性拟合结果,检验系数 $R = 0.62$,$P < 0.01$,通过 $P < 0.01$的显著性检验,年平均气温呈现显著的升

表 3　气象格点位置及权重

Tab. 3　Location and weight of the grid

格点编号	经度 / °E	纬度 / °N	缓冲区内冰川面积 / km²	权重
1	89.25	28.25	156.69	0.03
2	89.25	27.75	122.30	0.02
3	89.75	28.25	563.84	0.11
4	89.75	27.75	414.19	0.08
5	90.25	28.25	1 131.59	0.22
6	90.25	27.75	770.15	0.15
7	90.75	28.25	702.81	0.14
8	90.75	27.75	448.52	0.09
9	91.25	28.25	245.06	0.05
10	91.25	27.75	209.82	0.04
11	91.75	28.25	188.53	0.04
12	91.75	27.75	161.09	0.03
合计			5 114.59	1

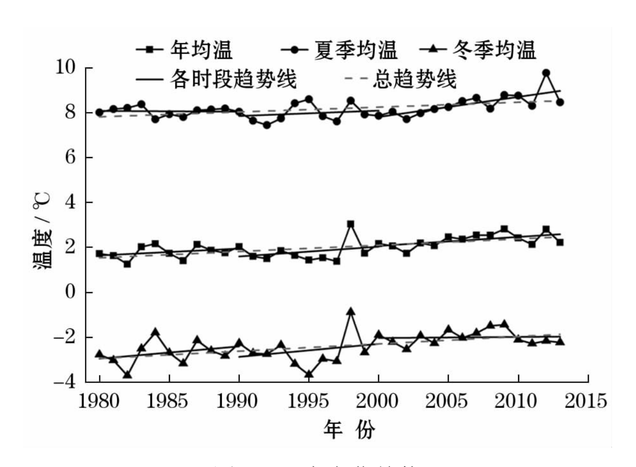


图 4　温度变化趋势

Fig. 4　Variation trend in air temperature

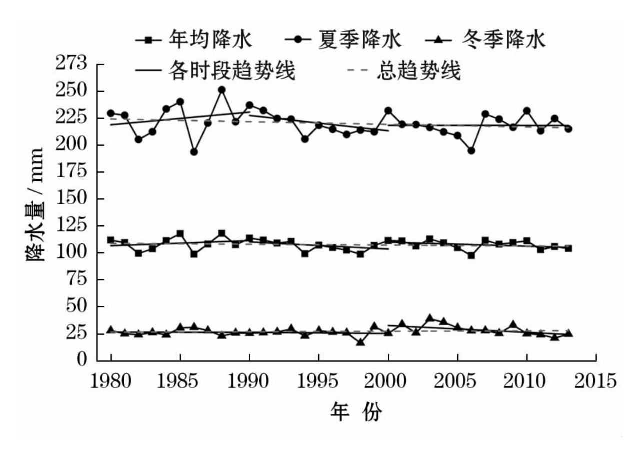


图 5　降水变化趋势

Fig. 5　Trend variation in rainfall

高趋势。研究区年平均气温在 1980—2013 年间，上升约 0.5 ℃，平均升高幅度为 0.015 ℃ · a^{-1}。夏季平均气温一元线性拟合结果，检验系数 $R = 0.54$，$P < 0.01$，通过 $P < 0.01$ 的显著性检验，夏季平均气温呈现显著的增长趋势。研究区夏季平均气温在 1980—2014 年间，上升约 0.45 ℃，平均升温幅度为 0.013 ℃ · a^{-1}。冬季平均气温一元线性拟合结果，检验系数 $R = 0.522\,3$，$P < 0.01$，通过 $P < 0.01$ 的显著性检验，冬季平均气温呈现显著的增长趋势。研究区冬季平均气温在 1980—2013 年间，上涨约 0.66 ℃，平均上升幅度为 0.019 ℃ · a^{-1}。

对温度变化趋势以 1980—1990 年、1990—2000 年以及 2000—2013 年三个时段进行划分并拟合，得到温度分段变化趋势。由图 4 可知，三个时段，温度变化均呈现逐渐增大的趋势。其中，以 1990—2000 年，年均温度、冬季温度增加趋势较其他两个时段更快，2000—2013 年这一时段，夏季均温增长幅度最快。

3.4.2　降水变化分析　年降水为各格点 12 个月份降水值的算术平均值，对年降水进行一元线性拟合得到研究区各年降水的变化趋势曲线。取研究区各格点夏半年（5 ~ 9 月）降水统计数值进行加权平均计算，得到研究区 1980—2013 年暖季降水变化曲线。取研究区各格点冬半年（10 ~ 4 月）降水统计数值进行加权平均计算，得到研究区 1980—2013 年冷季降水变化曲线。

图 5 显示，研究区 1980—2013 年年均降水一元线性拟合结果，拟合系数 $R = 0.15$，$P = 0.16$，没有通过 $P < 0.01$ 的显著性检验，年均降水量呈现不显著的降低趋势。研究区年均降水在 1980—2013 年间，

表 4　不同时段气温、降水变化

Tab. 4　Variation of air temperature and rainfall in different period

		1980—1990	1990—2000	2000—2013	1980—2013
气温年	冬半年	0.055	0.058	0.005	0.019
变化率	夏半年	0.004	0.004	0.089	0.013
/ ℃ · a^{-1}	年平均	0.031	0.044	0.040	0.015
降水年	冬半年	−0.030	−0.115	−0.634	0.041
变化率	夏半年	1.174	−1.416	−0.011	−0.245
/ mm · a^{-1}	年平均	0.472	−0.657	−0.375	−0.078

减少约 7.93 mm，平均下降幅度为 2.4 mm ·（10 a）$^{-1}$。夏季降水一元线性拟合结果，检验系数 $R = 0.13$，$P = 0.20$，没有通过 $P < 0.01$ 的显著性检验，夏季降水呈现不显著的降低趋势。研究区夏季降水在 1980—2014 年间，减少约 14.45 mm，平均下降幅度为 4.38 mm ·（10 a）$^{-1}$。冬季降水一元线性拟合结果，检验系数 $R = 0.096\,4$，$P = 0.717\,1$，没有通过 $P < 0.01$ 的显著性检验，冬季降水增多趋势不显著。

对降水量变化趋势以 1980—1990 年、1990—2000 年以及 2000—2013 年三个时段进行划分并拟合，得到降水量分段变化趋势。由图 5 看出，1980—2000 年时段，夏季降水量及年均降水量呈现出增长趋势，冬季降水量呈现下降趋势，1990—2000 年时段及 2000—2013 年时段，降水量均呈现不断下降趋势。其中，以 1990—2000 年，年均降水量、夏季降水量下降趋势较其他两个时段更快，冬季降水量下降速度以 2000—2013 年这一时段最快。对不同时段进行拟合，得到各时段气温、降水年变化率（表 4）。

对比气温降水资料显示,1990—2013 年间,温度呈现明显升高趋势,与冰川消融速度加快趋势较为一致,降水变化不够显著。结合其他文章中的喜马拉雅山地区气温降水情况[16],与现有气象站点数据以及冰芯中的记录对比来看,卫星数据也较为可靠,其结论相近。[在现在研究中,通常认为,温度上升,导致冰川面积的退缩。降水增加,对冰川物质有一定的补充作用。]在研究区的研究时段内,由表 4 可见,冬夏季温度均持续上升,冬季均温上升幅度略快于夏季。但降水的变化幅度不大,从 1990—2013 年间各时段来看降水均有减少。降水降低趋势不够显著,而温度上升明显。结合各时段冰川退缩情况,1990—2015 年间,冰川退缩速率逐步加快,与气温升高的变化趋势较为一致,故而认为,在该地区,温度上升是冰川退缩的主导因素。

4　冰川表面流速估算

选取研究区两条冰川,两条冰川位置相邻,面积相近,冰川长度相近,将西侧无冰前湖冰川记为 a 冰川,东侧有冰前湖冰川编号为 b 冰川。本文使用 Landsat 数据以及 CIAS(Correlation Image Analysis Software)软件对冰川表面流速进行估算[16]。根据参考文献中知道,需要使用的是该地区清晰无云的两期,间隔一年左右的遥感影像,影像选择在研究时段内效果较好、较新的数据进行拟合。b 冰川在冰川编目中的名称是什磨冰川,a 冰川在冰川编目中的编号为 G090001E28216N, b 冰川编号为 G090039E28192N[33]。

图 6 由 2011 年 12 月 18 日和 2012 年 12 月 20 日两景 15 m 全色波段通过 CIAS 估算获得。

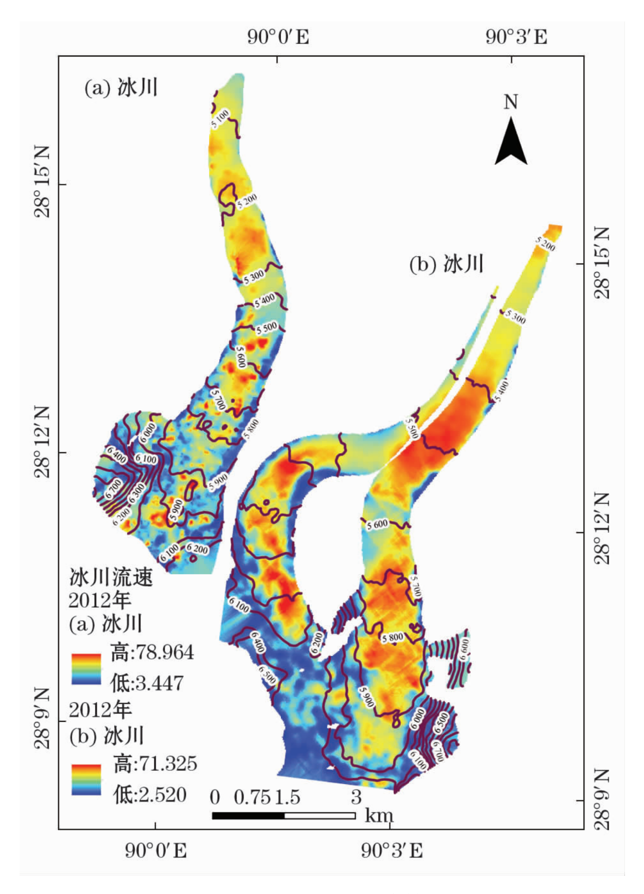


图 6　表面流速估算

Fig. 6　Surface velocity estimation

由图 6 可见,沿冰川主流线方向,从冰川上端至冰川末端方向上,冰川流速呈现先增大,后减小的变化趋势,在海拔 5 500 m 左右位置,冰川流速最大[34],该位置可能在冰川的平衡线附近,该位置以上,冰川流速逐渐减慢,至最高海拔位置,冰川流速最小。沿冰川主流线方向向冰川两侧,冰川流速逐渐减小,该现象与以往观测到的冰川运动规律相符[35],与冰川存在的地形及温度因素相关。

在以往的表面流速文章中,以及本文的 a 冰川表面流速分析中,均可以看到,随着海拔高度的降低,冰川流速逐渐减小,在冰川末端位置,流速较小[36]。而在 b 冰川的表面流速估算结果中看到,随着海拔降低,a 冰川流速逐渐减小,但在冰川最末端的位置处,却出现了一个异常高值。有些文章中提到,冰川冰前湖对冰川消融具有一定的促进作用[37],对比其他文章中的部分地区遥感影像,可以看出有冰前湖存在的冰川,退缩速度快于其他冰川冰前湖面积变化与冰川面积变化成负相关关系。结合四期影像对比可知,a 冰川与 b 冰川位置相邻,a 冰川末端海拔略低于 b 冰川,但 b 冰川消融面积及消融速度远快于冰川。对此,可能的原因是,冰川湖面积增大,导致冰川末端更易伸入冰川湖内,末端浮力增大,加速消融[38]。冰川消融与冰前湖面积变化,呈现正反馈状态[39],冰川的消融,促进了冰前湖面积的增大,冰前湖面积的扩大促进冰川消融[40]。冰前湖面积变化与气温变化呈现正相关,冰川面积与气温变化呈现负相关[41]。此外,在一定程度上,由于冰与水比热容的不同,以及温度上的差异,冰前湖将热量传导给冰川末端,不断促进着冰川的消融,所以相同情况下,有冰前湖的 b 冰川比没有冰前湖的 a 冰川,其末端消融速度相对更快,所以出现了流速估算曲线中的末端高值。

5 结 论

1990—2015 年,研究区冰川退缩面积达 191.87 km^2,占 1990 年冰川总面积的 10.78%,25 a 间冰川呈现逐渐退缩的趋势。研究区冰川年平均退缩速率为 0.43% · a^{-1},且冰川年退缩率逐渐增大,表明冰川消融速度逐渐加快。在气候变暖的大背景下,研究区冰川逐步退后,退缩速率逐步加快。

研究区冰川在 $2^3 \sim 2^4$ 面积段内分布最为集中,研究区小面积冰川数量较多,数量最多的冰川集中在 $2^{-2} \sim 2^{-1}$、$2^{-1} \sim 2^0$ 的区域内。研究区不同面积分级的冰川大都呈现退缩状态,面积 > 1 km^2 的冰川变化幅度较大。冰川分布以北向、西北向、东北向为主要分布坡向,但各个朝向冰川面积分布差异不大。冰川面积退缩以东向、东南向、东北向为主要退缩方向,可能与地形及冰川分布有关,水汽输送通道的存在可能在一定程度上减慢了冰川的退缩速度。

1990—2013 年间,温度呈现明显升高趋势,与冰川消融速度加快趋势较为一致,降水变化不够显著。故认为,该地区的冰川消融,是对温度升高的响应。冰川面积的变化与气温变化呈现负相关趋势,冰前湖面积变化与温度变化呈现正相关趋势。

沿冰川主流线方向,从冰川上端至冰川末端方向上,冰川流速呈现先增大,后减小的变化趋势,在平衡线左右位置,冰川流速最大。其中具有冰川湖的冰川末端,出现了一个异常的流速变快区域,是由于冰川湖的存在,促进了冰川末端的消融。冰前湖面积的扩大,使冰川前端伸入湖中,末端浮力增大,加速消融。同时由于水与冰的比热及温度不同,湖水将热量传导给冰川末端,加速了冰川的消融。冰川的不断退缩,使许多冰川湖从无到有,面积不断变大,冰川湖的存在,又促进了冰川面积的不断退缩。

参考文献(References)

[1] 刘宗香,苏珍,姚檀栋,等. 青藏高原冰川资源及其分布特征[J]. 资源科学,2000,22(5):49-52. [LIU Zongxiang, SU Zhen, YAO Tandong, et al. Resources and distribution of glaciers on the Tibetan Plateau[J]. Resources Science, 2000, 22(5):49-52.]

[2] 许艾文,杨太保,王聪强,等. 1978—2015 年喀喇昆仑山克勒青河流域冰川变化的遥感监测[J]. 地理科学进展,2016,35(7):878-888. [XU Aiwen, YANG Taibao, WANG Congqiang, et al. Variation of glaciers in the Shaksgam River Basin, Karakoram Mountains during 1978—2015[J]. Progress in Geography, 2016, 35(7):878-888.]

[3] 何毅,杨太保,冀琴,等. 1989—2011 年北天山东西段冰川变化对比分析研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(6):105-110. [HE Yi, YANG Taibao, JI Qing, et al. Comparative analysis of glacier changes between eastern and western part of northern Tianshan[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(6):105-110.]

[4] 冀琴,杨太保,田洪阵,等. 念青唐古拉山西段近 40 年冰川与气候变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(7):12-17. [JI Qin, YANG Taibao, TIAN Hongzhen, et al. Relation between glacier retreat and climate change in the western Nyainqentanglha in the past 40 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(7):12-17.]

[5] 祝合勇,杨太保,田洪阵. 1973—2010 年阿尔金山冰川变化[J]. 地理研究,2013,32(8):1430-1438. [ZHU Heyong, YANG Taibao, TIAN Hongzhen, Glacier variation in the Altun Mountains from 1973 to 2010[J]. Geographical Research, 2013, 32(8):1430-1438.]

[6] 许艾文,杨太保,冀琴,等. 乔戈里峰北坡冰川跃动遥感监测[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2016,52(2):145-152. [XU Aiwen, YANG Taibao, JI Qin, et al. Monitoring recent surging on the northern slope glaciers of Qogir through remote sensing[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2016, 52(2):145-152.]

[7] 李吉均,郑本兴,杨锡金,等. 西藏冰川[M]. 北京:科学出版社,1986. [LI Jijun, ZHEN Benxing, YANG Xijin, et al. Glacier in Tibet[M]. Beijing: Science Press, 1986.]

[8] 谢自楚,冯清华,刘潮海. 冰川系统变化的模型研究——以西藏南部外流水系为例[J]. 冰川冻土,2002,24(1):16-27. [XIE Zichu, FENG Qinghua, LIU Chaohai. Modeling the variation of glacier system: Taking the southern Tibet region as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(1):16-27.]

[9] 李治国,姚檀栋,叶庆华,等. 1980—2007 年喜马拉雅东段洛扎地区冰川和冰湖变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(7):47-52. [LI Zhiguo, YAO Tandong, YE Qinghua, et al. Variations of glaciers and glacial lakes in the Luozha region, eastern Himalayas, from 1980 to 2007[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(7):47-52.]

[10] 张东启,效存德,秦大河. 近几十年来喜马拉雅山冰川变化及其对水资源的影响[J]. 冰川冻土,2009,31(5):885-895. [ZHANG Dongqi, XIAO Cunde, QIN Dahe. Himalayan glaciers fluctuation over the latest decades and its impact on water resources[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(5):885-895.]

[11] 王欣,刘时银,姚晓军,等. 我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目[J]. 地理学报,2010,65(1):29-36. [WANG Xin, LIU Shiyin, YAO Xiaojun, et al. Glacier lake investigation and inventory in the Chinese Himalayas based on the remote sensing data[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1):29-36.]

[12] 李治国,姚檀栋,叶庆华,等. 1980—2007 年喜马拉雅东段洛扎地区冰川变化遥感监测[J]. 地理研究,2011,30(5):939-952. [LI Zhiguo, YAO Tandong, YE Qinghua, et al. Monitoring glacial variations based on remote sensing in the Luozha region, eastern Himalayas, 1980—2007[J]. Geographical Research, 2011, 30(5):939-952.]

[13] 苏珍,宋国平,曹真堂. 贡嘎山海螺沟冰川的海洋性特征[J]. 冰川冻土,1996,(增刊1):51－59. [SU Zhen,SONG Guoping,CAO Zhentang. Maritime characteristics of Hailuogou Glacier in the Gongga Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,1996,(Suppl. 1):51－59.]

[14] PAUL F,KAAB A,MAISCH M,et al. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods[J]. Annals of Glaciology,2002,34:355－361.

[15] 王秀娜. 近40年来南阿尔泰山地区现代冰川变化及对气候变化的响应[D]. 兰州:兰州大学,2012. [WANG Xiuna. Response of glacier variation to climate change in the southern Altai Mountains,during the last 40 years[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2012.]

[16] KAAB A,VOLLMER M. Surface geometry,thickness changes and flow fields on creeping mountain permafrost: Automatic extraction by digital image analysis[J]. Permafrost and Periglacial Processes,2000,11(4):315－326.

[17] WOODCOCK C E,ALLEN R,ANDERSON M,et al. Free access to Landsat imagery[J]. Science,2008,320(5879):1011－1011.

[18] WULDER M A,MASEK J G,COHEN W B,et al. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat[J]. Remote Sensing of Environment,2012,122: 2－10.

[19] 陈杰,杨太保,冀琴,等. 1976—2014年爬努河流域冰川变化对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(9):171－175. [CHEN Jie,YANG Taibao,JI Qin,et al. Glaciers in response to climate change in the Panuhe Basin,Tibet from 1976 to 2014 [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2015,29(9):171－175.]

[20] 吕卉. 近40年喜马拉雅山冰川波动对气候变化的响应[D]. 兰州:兰州大学,2013. [LYU Hui. Response of glacier variation to climate change in the Himalayan Mountains,during the last 40 years[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2013.]

[21] 刘时银,上官冬辉,丁永建,等. 20世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化[J]. 冰川冻土,2005,27(1):55－63. [LIU Shiyin,SHANGGUAN Donghui,DING Yongjian,et al. Glacier variations since the early 20th Century in the Gangrigabu Range,southeast Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2005,27(1):55－63.]

[22] 吕卉,杨太保,田洪阵. 北阿尔泰山近30年冰川变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(10):69－76. [LYU Hui,YANG Taibao,TIAN Hongzhen. Glacier changes in the northern Altay Mountains from 1980 to 2010[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012,26(10):69－76.]

[23] KULKARNI A V,RATHORE B P,SINGH S K,et al. Understanding changes in the Himalayan cryosphere using remote sensing techniques[J]. International Journal of Remote Sensing,2011,32(3):601－615.

[24] 车涛,李新,MOOL P K,等. 希夏邦马峰东坡冰川与冰川湖泊变化遥感监测[J]. 冰川冻土,2005,27(6):801－805. [CHE Tao, LI Xin,MOOL P K,et al. Monitoring glaciers and associated glacial lakes on the east slopes of mount Xixabangma from remote sensing images[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2005,27(6):801－805.]

[25] 叶庆华,陈锋,姚檀栋,等. 近30年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究 [J]. 遥感学报,2007,11(4): 511－520. [YE Qinghua,CHEN Feng,YAO Tandong,et al. Tupu of glacier variations in the Mt. Naimona'Nyi Region,Western Himalayas,in the last three decades[J]. Journal of Remote Sensing,2007,11(4):511－520.]

[26] 叶庆华,姚檀栋,郑红星,等. 西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变化及其对气候变化的响应[J]. 地理研究,2008,27(5):1178－1190. [YE Qinghua, YAO Tandong, ZHENG Hongxing, et al. Glacier and lake co-variations and their responses to climate change in the Mapam Yumco Basin on Tibet[J]. Geographical Research,2008,27(5):1178－1190.]

[27] YE Q,ZHONG Z,KANG S,et al. Monitoring glacier and supra-glacier lakes from space in Mt. Qomolangma region of the Himalayas on the Tibetan Plateau in China[J]. Journal of Mountain Science,2009,6(3):211－220.

[28] 王聪强,杨太保,冀琴,等. 1988—2013年布加岗日地区冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究,2016,23(4):70－76. [WANG Congqiang,YANG Taibao,JI Qin,et al. Variation of glacier and its response to climate change in the Bujiagangri region from 1988 to 2013[J]. Research of Soil and Water Conservation,2016,23(4):70－76.]

[29] 李佳,杨太保,何毅,等. 1990—2011年天山东部冰川退缩对气候的响应[J]. 水土保持研究,2014,21(3):212－216. [LI Jia,YANG Taibao,HE Yi,et al. Response of glacier retreat to climate in Eastern Tianshan from 1990 to 2011[J]. Research of Soil and Water Conservation,2014,21(3):212－216.]

[30] 王霄,巩远发,岑思弦. 夏半年青藏高原"湿池"的水汽分布及水汽输送特征[J]. 地理学报,2009,64(5):601－608. [WANG Xiao,GONG Yuanfa,CEN Sixian. Characteristics of the Moist Pool and its moisture transports over Qinghai-Xizang Plateau in summer half year[J]. Acta Geographica Sinica,2009,64(5):601－608.]

[31] 王秀娜,杨太保,田洪振,等. 近40 a来南阿尔泰山区现代冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(2):77－82. [WANG Xiuna,YANG Taibao,TIAN Hongzhen,et al. Response of glacier variation in the southern Altai Mountains to climate change during the last 40 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(2):77－82.]

[32] 冀琴,杨太保,李霞. 近40年来念青唐古拉山东段则普乡地区冰川与气候变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(2):166－171. [JI Qin,YANG Taibao,LI Xia. Relationship between glacier retreat and climate change in eastern Nyainqentanglha in the past 40 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2015,29(2):166－171.]

[33] KUMARI S,GHOSH S K,BUCHROITHNERB M F. Measurement of glacier velocity at Pik Lenin,Tajikistan,by feature tracking[J]. International Archives of the Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2014,8.

[34] 韩艳飞. 基于Landsat遥感影像的西昆仑冰川变化监测与流速估算研究(1977—2013)[D]. 南京:南京大学,2015. [HAN Yanfei. Research on glacier change in the West Kunlun Moutains and flow velocity estimation based on Landsat images (1977—2013)[D]. Nanjing: Nanjing University,2015.]

[35] 刘时银,刘潮海,谢自楚,等. 冰川观测与研究方法[M]. 北京:科学出版社,2012. [LIU Shiyin,LIU Chaohai,XIE Zichu,et al. Field observations and glaciological research[M]. Beijing: Science

Press,2012.]
[36] 蒋宗立,刘时银,许君利,等.应用SAR特征匹配方法估计音苏盖提冰川表面流速[J].冰川冻土,2011,33(3):512-518. [JIANG Zongli,LIU Shiyin,XU Junli,et al. Using feature-tracking of alos palsar images to acquire the Yengisogat Glacier surface velocities[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2011,33(3):512-518.]
[37] 周文明,李志伟,李佳,等.1992—2009年格拉丹东冰川及冰前湖面积变化的遥感研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(10):3505-3512. [ZHOU Wenming,LI Zhiwei,LI Jia,et al. Variations of glaciers and glacial lake in Geladandong mountain range in 1992—2009 with remote-sensing technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2014,45(10):3505-3512.]
[38] 刘春玲,童立强,祁生文,等.喜马拉雅山地区冰川湖溃决灾害隐患遥感调查及影响因素分析[J].国土资源遥感,2016,28(3):110-115. [LIU Chunlin,TONG Liqiang,QI Shengwen,et al. Remote sensing investigation and influence factor analysis of glacier lake outburst potential in the Himalayas[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2016,28(3):110-115.]
[39] 刘秧.西藏终碛堤冰湖溃决冰川、温度条件的初步研究[D].成都:成都理工大学,2016. [LIU Yang. Preliminary study on the glacial and temperature conditions of terminal moraine dam glacier lake outburst in Tibet[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2016.]
[40] 王欣,刘时银,莫宏伟,等.我国喜马拉雅山区冰湖扩张特征及其气候意义[J].地理学报,2011,66(7):895-904. [WANG Xin,LIU Shiyin,MO Hongwei,et al. Expansion of glacial lakes and its implication for climate changes in the Chinese Himalaya[J]. Acta Geographica Sinica,2011,66(7):895-904.]

Change of the modern glaciers in the eastern Himalaya near China and Bhutan border area from 1990 to 2015

WANG Jing, YANG Tai-bao, JI Qin, QIN Yan, HU Fan-sheng

(*Institute of Glaciology and Ecogeography*,*College of Earth and Environmental Science*,*Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000,*Gansu*,*China*)

Abstract: Using the remote sensing technology and the visual interpretation, this paper extracted the glacier boundaries of four phases in the border area between China and Bhutan in eastern Himalaya based on the Landsat image and the DEM image from 1990 to 2015 to investigate the relationship between the glacier boundary change and climate change. The results show that from 1990 to 2015, the shrunk area of the glacier is 191.87 km^2, and the glacier region retreat rate on average reaches to 0.43% per year. According to the time division, the average annual retreat rate of glaciers was increased gradually, indicating that the glacier ablation rate was gradually accelerated. The total area of glaciers in the region showed a decreasing trend, and the glacier area of different grades showed a trend of retreat. The distribution of glaciers is mainly north, north-west and north-east oriented while the main direction of retreat is east, southeast and northeast oriented. based on meteorological grid data, the change rates of air temperature and precipitation in winter and summer were retrieved by using the fitting operation on the air temperature and precipitation in different time periods. From 1990 to 2015, there was not obvious variation in precipitation while the temperature was significantly raised up. Therefore, it is believed that the main factor of glacier retreat is the rising temperature. Two specific adjacent glaciers were chosen to estimate the surface velocity using the CIAS software and it is found that the surface velocity of glacier is the fastest near the equilibrium line. The glacier flow rate was gradually slowed down to the highest altitude, and the glacier flow rate was the minimum. The glacier flow rate was gradually decreased along both sides of the glacier main stream. The surface velocity estimation shows that the chosen ice lake in the Bhutan region may speed up the melting of the glacier. There is a negative correlation between the change of glacier area and the change of temperature. There is a positive correlation between the change of ice front area and temperature change.

Key words: Landsat image; the eastern Himalaya region; the change of glaciers; surface velocity estimation